

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

*Сугак Е.В.*

*Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М.Ф. Решетнёва, г.Красноярск*

**Ключевые слова:** техническое обслуживание, управление техническим состоянием, безопасность, коэффициент готовности, технический риск.

**Аннотация.** Рассматривается определение коэффициента готовности (вероятности состояния готовности) потенциально опасных машин и оборудования при различных сочетаниях параметров системы технического обслуживания и ремонта для установившегося режима эксплуатации. Полученные результаты дают возможность решать задачи управления техническим состоянием, оптимизации надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов.

## OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF MAINTENANCE AND REPAIR OF POTENTIALLY DANGEROUS MACHINES AND EQUIPMENT

*Sugak E.V.*

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk*

**Keywords:** maintenance, technical condition management, safety, availability coefficient, technical risk.

**Abstract.** The definition of the readiness factor (probability of readiness state) of potentially dangerous machinery and equipment, with different combinations of maintenance and repair system parameters for the established operating regime, is being considered. The results provide an opportunity to solve the problems of technical condition management, optimization of reliability and safety of potentially dangerous industrial facilities.

Особенности развития техногенной среды за последнее время с неизбежностью приводит к необходимости использования системного подхода к проектированию и эксплуатации потенциально опасных технических объектов, анализу техногенных и экологических рисков, промышленной и экологической безопасности с использованием методов системного анализа, теории случайных процессов, теории надежности и современных вычислительных и информационных технологий [1-5].

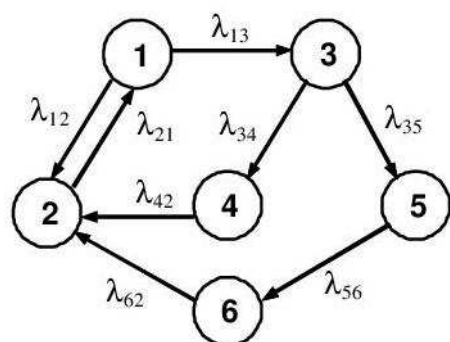
Эксплуатация технической системы – непрерывный процесс, требующий планового и регулярного контроля и воздействия на объект в целом или на его составляющие и элементы, что должно обеспечивать его рабочее состояние и высокий уровень эксплуатационной надежности, который может быть обеспечен при решении двух основных задач: обеспечение нормальных режимов работы элементов и объекта в целом, прогнозирование индивидуального ресурса и назначение оптимальных регламентов эксплуатации [6, 7]. Решение первой задачи предусматривает разработку специальных мер, обеспечивающих снижение предельных режимов нагружения, износа и старения, уменьшение динамических нагрузок [8]. Решение второй задачи включает выбор оптимальной

системы обслуживания, разработку системы контроля, диагностики, сбора и обработки информации о качестве функционирования, принятие оптимальных с точки зрения технико-экономических критериев различных этапов эксплуатации, повышение качества восстановления [6].

Решение задач оптимизации системы технического обслуживания включает, как правило, построение графа состояний, составление модели надежности и определение характеристик системы технического обслуживания [9-11]. При этом обычно рассматриваются установившиеся режимы и, соответственно, стационарные модели надежности и финальные значения вероятностей состояний [9-11].

Однако для потенциально опасного оборудования, у которого отказ приводит к угрозе жизни и безопасности человека или возможности загрязнения окружающей среды, оптимизация системы технического обслуживания и ремонта в большинстве случаев не позволяет обеспечить необходимый уровень надежности и, соответственно, допустимого (приемлемого) технического риска [11]. В этих случаях единственным способом обеспечения требуемой безопасности промышленного оборудования является резервирование объекта в целом или его элементов [6, 9, 11].

На рисунке 1 представлен граф состояний резервированного (дублированного) объекта с периодическим техническим обслуживанием (или контролем технического состояния), у которого количество состояний равно шести и, соответственно, возможны переходы восьми видов [9].



- 1 – работоспособное состояние (готовность к работе) основного и резервного объектов;  
 2 – техническое обслуживание при двух работоспособных объектах; 3 – работоспособное состояние (готовность к работе) одного из объектов; 4 – техническое обслуживание при одном работоспособном объекте; 5 – отказ второго объекта; 6 – техническое обслуживание при двух отказавших объектах

Рис. 1. Граф состояний резервированного объекта с периодическим техническим обслуживанием

Если для технического обслуживания основной и резервный объекты выводятся из работоспособного состояния, т.е. отключаются, то работоспособными являются только состояния 1 и 3 (готовности к работе двух и одного объекта, соответственно) и основным показателем надежности и безопасности можно считать коэффициент готовности как сумму вероятностей первого и третьего состояний  $K_1 = P_1 + P_3$ . Если же техническое обслуживание осуществляется без отключения, то работоспособными являются состояния 1, 2, 3 и 4 и показателем надежности и безопасности является коэффициент готовности как сумма вероятностей этих состояний  $K_2 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$ . Соответственно, в первом случае величина техногенного риска  $R_1 = 1 - K_1$ , во втором –  $R_2 = 1 - K_2$ .

Интенсивность отказов  $\lambda$ , периодичность технического обслуживания  $t_{TO}$ , среднее время технического обслуживания  $\tau_{TO}$  и устранения отказов (ремонта)  $\tau_p$

и, соответственно, интенсивности переходов  $\lambda_{12} = 1/t_{TO}$ ,  $\lambda_{13} = 2\lambda$ ,  $\lambda_{21} = 1/\tau_{TO}$ ,  $\lambda_{35} = \lambda$  и  $\lambda_{42} = \lambda_{62} = 1/(\tau_{TO} + \tau_p)$  могут быть получены по результатам экспериментальных исследований (испытаний), данных об эксплуатации или задаются регламентом. Для нахождения интенсивностей переходов  $\lambda_{34}$  и  $\lambda_{56}$  можно воспользоваться свойствами марковских процессов с непрерывным временем [12]:

$$\lambda_{34} = \left[ t_{TO} - \left( 2\lambda + \frac{1}{t_{TO}} \right)^{-1} \right]^{-1} \left\{ \lambda \left[ t_{TO} - \left( 2\lambda + \frac{1}{t_{TO}} \right)^{-1} \right] + 1 \right\}^{-1} = \frac{1}{\lambda t_{TO}^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{(1 + 2\lambda t_{TO})^2}}, \quad (1)$$

$$\lambda_{56} = \left[ \left( 2\lambda + \frac{1}{t_{TO}} \right)^{-1} - \frac{t_{TO}}{2} \right]^{-1} = \frac{2}{t_{TO}} \cdot \frac{1 + 2\lambda t_{TO}}{1 - 2\lambda t_{TO}}. \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений для ориентированного графа состояний на рис. 1 имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{42}P_4(t) + \lambda_{62}P_6(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13}P_1(t) - (\lambda_{34} + \lambda_{35})P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{42}P_4(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_{35}P_3(t) - \lambda_{56}P_5(t); \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_{56}P_5(t) - \lambda_{62}P_6(t). \end{cases} \quad (3)$$

Систему (3) необходимо дополнить нормирующим условием

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) = 1 \quad (4)$$

и начальными условиями, например

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = 0. \quad (5)$$

Численный анализ системы дифференциальных уравнений (3) показывает, что при  $\lambda \leq 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$  переходные процессы практически отсутствуют и при анализе можно перейти к системе алгебраических уравнений для установившегося режима и финальных вероятностей состояний [9]:

$$\begin{cases} -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1 + \lambda_{21}P_2 = 0; \\ \lambda_{12}P_1 - \lambda_{21}P_2 + \lambda_{42}P_4 + \lambda_{62}P_6 = 0; \\ \lambda_{13}P_1 - (\lambda_{34} + \lambda_{35})P_3 = 0; \\ \lambda_{34}P_3 - \lambda_{42}P_4 = 0; \\ \lambda_{35}P_3 - \lambda_{56}P_5 = 0; \\ \lambda_{56}P_5 - \lambda_{62}P_6 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из решения системы уравнений (6) с учетом нормирующего условия (4) можно получить выражения для коэффициентов готовности при техническом

обслуживании с отключением  $K_1 = P_1 + P_3$  и техническом обслуживании без отключения  $K_2 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$ :

$$K_1 = \frac{1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}}}{1 + \frac{\lambda_{12} + \lambda_{13}}{\lambda_{21}} + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}} \left( 1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{42}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{62}} \right)}, \quad (7)$$

$$K_2 = 1 - \frac{\lambda_{35} \left( \frac{1}{\lambda_{56}} + \frac{1}{\lambda_{62}} \right) \left( 1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}} \right)}{1 + \frac{\lambda_{12} + \lambda_{13}}{\lambda_{21}} + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34} + \lambda_{35}} \left( 1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{42}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{62}} \right)}. \quad (8)$$

Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 2.

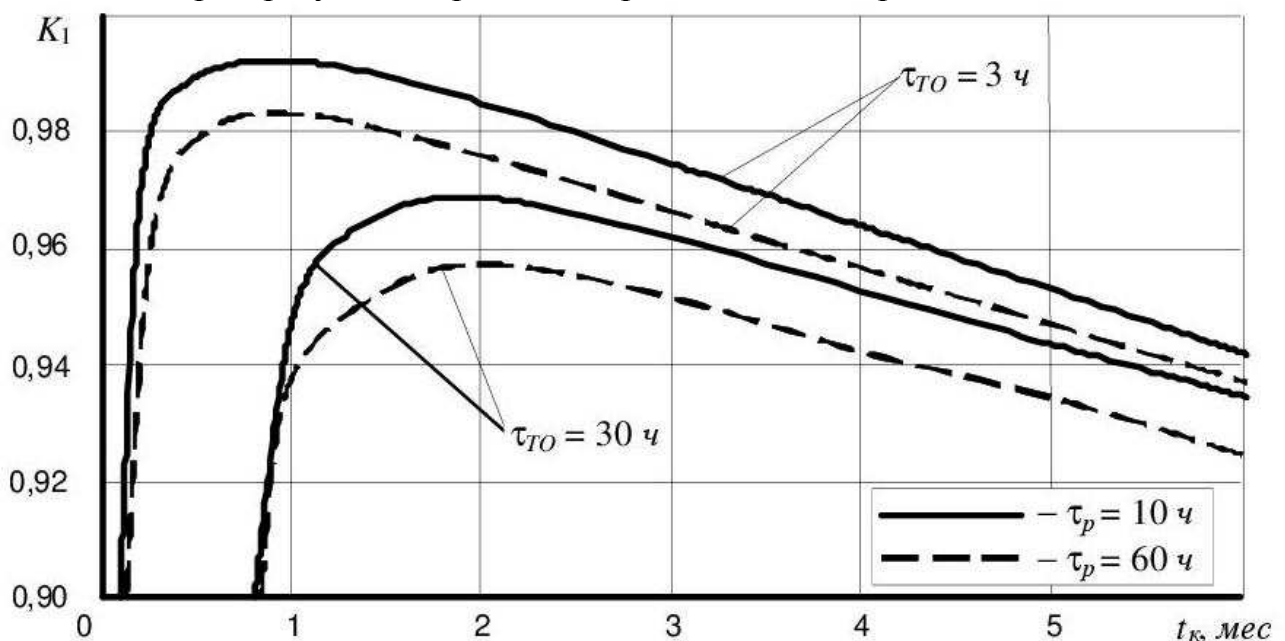


Рис. 2. Зависимость вероятности готовности резервированного объекта от периодичности контроля ( $\lambda = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ )

Из анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

- наибольшее влияние на уровень безопасности оказывают интенсивность отказов  $\lambda$  и периодичность технического обслуживания  $t_{TO}$ ;
- максимум значения коэффициента готовности с уменьшением  $\lambda$  смещается в сторону больших значений  $t_{TO}$  (рис.2);
- оптимальная периодичность технического обслуживания  $t_{TO}$  пропорциональна его продолжительности  $\tau_{TO}$ ;
- отклонения периодичности технического обслуживания  $t_{TO}$  от оптимального значения (особенно в сторону уменьшения) существенно снижают коэффициента готовности объекта, особенно при больших значениях интенсивности.

Полученные решения (7) и (8) дают возможность решать задачи управления техническим состоянием, оптимизации показателей надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов.

**Список литературы**

1. Владимиров В.А. и др. Управление риском. Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. – М., 2000. – 431 с.
2. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
3. Александровская Л.Н., Аронов И.З., Круглов В.И. и др. Безопасность и надежность технических систем. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 376 с.
4. Сугак Е.В., Окладникова Е.Н., Кузнецов Е.В. Вычислительные и информационные технологии анализа и оценки социально-экологических рисков // Экология и промышленность России. 2008. № 8. С. 24-29.
5. Сугак Е.В. Современные методы оценки экологических рисков // European Social Science Journal. 2014. № 5 (44). Т. 2. С. 427-433.
6. Емелин Н.М. Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1995. – 128 с.
7. Невзоров В.Н., Сугак Е.В. Надежность машин и оборудования. Ч.2. Проектирование, эксплуатация, экспериментальные исследования. – Красноярск: Сибирский государственный технологический университет, 1998. – 264 с.
8. Невзоров В.Н., Сугак Е.В. Надежность машин и оборудования. Ч.1. Основы теории. – Красноярск: Сибирский государственный технологический университет, 1998. – 240 с.
9. Сугак Е.В. и др. Надежность технических систем. – Красноярск: Раско, 2001. – 608 с.
10. Окладникова Е.Н., Сугак Е.В. Планирование системы технического обслуживания // Вестник СибГАУ. 2006. № 6(13). С. 66-70.
11. Сугак Е.В. Оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных механизмов и машин // Современные проблемы теории машин. 2019. № 7. С. 86-91.
12. Сугак Е.В., Окладникова Е.Н. Прикладная теория случайных процессов. – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 168 с.

**Сведения об авторе:**

*Сугак Евгений Викторович* – д.т.н., профессор, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, г.Красноярск.